



TITLE:

モード同期Yb：KYWレーザーを用いた光周波数コム(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

三瀧, 雅俊

CITATION:

三瀧, 雅俊. モード同期Yb：KYWレーザーを用いた光周波数コム. 京都大学, 2019, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2019-07-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22013>

RIGHT:

許諾条件により本文は2020-07-22に公開

京都大学	博士（工学）	氏名	三 瀧 雅 俊
論文題目	モード同期 Yb:KYW レーザーを用いた光周波数コム		
<p>本論文は、光周波数標準の評価と応用に不可欠な、低雑音で長時間連続運転可能な光周波数コム(光コム)に関する研究について述べたもので、11 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論である。光コム開発の歴史と既存の光コムについて概説し、本研究で開発した光コムの優位性を中心に、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。具体的には、現在までに、チタニウムサファイアレーザーとファイバーレーザー、これら 2 種類のモード同期レーザーによる光コムが確立されていること、前者は低雑音だが長時間連続運転に、後者は長時間連続運転には向いているが低雑音化に特有の技術を必要とする点に短所があることが示されている。そして、本研究では、出力 1 W 未満の半導体レーザーによる直接励起で発振する固体レーザーを用いて、両者の長所をあわせもつ光コムの開発を目的とすることが述べられている。</p> <p>第 2 章は、本論文に関連する理論についてまとめたものである。光コムと光コムを用いた周波数計測、およびモード同期などについて述べている。非線形ファイバーによるスペクトル拡大に関して、シミュレーションの方法についても述べている。</p> <p>第 3 章は、Yb:KYW レーザーの共振器設計と、温度安定化と密閉構造により長時間連続運転を可能とした装置の詳細について述べたものである。後の章で球面鏡間隔や結晶位置を 10 μ m 程度の範囲に調整する必要性が示されるが、このレーザー装置の安定性により、1 ヶ月以上にわたるモード同期の維持と、3 時間をこえるレーザーへの位相同期が実現されている。</p> <p>第 4 章は、開発した Yb:KYW レーザーの特性について記述したものである。連続発振において、結晶長、ドーピング濃度、および出力鏡反射率を実験的に最適化し、先行研究と同等のスロープ効率を得ている。さらに、Yb:KYW 結晶に発振光を集光するために用いる球面鏡の間隔を変えたとき、安定領域中央近くの出力パワーが減少するところでモード同期が実現できることを見出し、励起パワー対出力パワー変換効率 48 %と、高効率なモード同期を実現したことを述べている。</p> <p>第 5 章は、ゼロ周波数からのオフセット周波数 (f_{CEO}) を自己参照で検出するために行った、フォトニック結晶ファイバーを用いたスペクトル幅 1 オクターブ以上への拡大について述べたものである。本研究では高効率なモード同期が奏功し、雑音源となりうる光増幅を用いることなく、スペクトル幅の 1 オクターブ以上への拡大を達成している。</p> <p>第 6 章は、f_{CEO} のスペクトル線幅狭窄化と位相同期に関して述べたものである。f_{CEO} の位相同期は通常、励起レーザーパワーを制御して行うが、Yb:KYW レーザーではその制御帯域が 45 kHz と狭い。したがって、非制御時のスペクトル線幅をこの値以下に狭窄化する必要がある。本研究により、f_{CEO} のスペクトル線幅が、レーザー共振器の群遅延分散、結晶位置、および励起レーザーパワーに依存することが見出され、最小半値全幅 15 kHz が達成されている。この結果、f_{CEO} を分周することなく位相同期が可能となり、残留位相ノイズは 0.51 rad と先行研究と同等の値を実現した。位相同期は 2 時間にわたる継続に成功し</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	三 瀧 雅 俊
<p>ている。</p> <p>第 7 章は、開発した光コムを R F 標準に位相同期させ、光周波数計測を実施した結果について述べている。光共振器の共鳴に安定化されたレーザーの周波数計測を行い、その周波数の時間変動が測定されている。被測定レーザーの周波数を測定すると同時に単一イオンのスペクトルを複数回観測し、測定された周波数変動を補正するとスペクトルがすべて重なった。この結果は、R F 標準の不確かさの光周波数計測システムを実現したことを示している。</p> <p>第 8 章は、2 つのレーザー光の周波数比計測を行うために必要な技術開発についてまとめたものである。この場合、光コムをレーザーに対して位相同期させるため、各モードの周波数間隔にあたるパルス繰り返し周波数 f_{rep} を高速で制御する必要がある。高速応答するピエゾ素子制御ミラーを開発して制御帯域 200 kHz を実現し、光コムのレーザーへの位相同期を達成した。残留位相ノイズ 0.47 rad を得ている。あわせて、f_{CEO} の位相同期の継続時間をさらに拡大するために、結晶位置のピエゾ素子による制御を導入したことに関しても記述している。</p> <p>第 9 章は、第 8 章で開発した方法を用いて実現した、光周波数比計測システムについて述べたものである。光共振器の共鳴に安定化されたレーザーへ、高速ピエゾ制御ミラーを用いて光コムを位相同期させたうえで、同じ光共振器の別の共鳴に安定化された波長の離れたレーザーと光コムとのビート周波数を、光共振器への安定化が途絶えた 3 時間にわたり測定している。</p> <p>第 10 章は、不確かさ 10^{-6} の汎用の波長計の併用で未知のレーザー光の周波数を決定可能とする、f_{rep} の高周波数化に関する研究をまとめたものである。f_{rep} を 380 MHz まで高め、Yb:KYW 結晶を用いた増幅率 1.4 倍の光増幅器を開発し、フォトニック結晶ファイバーを用いてスペクトル幅を 0.9 オクターブまで拡大している。</p> <p>第 11 章は、本論文の結論である。本研究の成果をまとめ、今後の課題と展望について論じている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、固体レーザーである Yb:KYW レーザーを、出力 1 W 未満の半導体レーザーで励起してモード同期発振させ、これを用いて低雑音かつ長時間連続運転可能な光コムの開発を行った研究の成果についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 本研究で用いられているモード同期方法は、実験を重ねる中で独自に見出された。通常の方法よりも高効率で高出力が得られることから、雑音源となりうる光増幅器を用いることなくスペクトル幅 1 オクターブを達成している。このことは、低雑音の光コム実現に向けて大きな成果であった。モード同期方法に関しては、のちに類似の先行研究の存在が明らかになったものの、同様のモード同期方法で光コムを実現した例は報告されていない。本研究は、用いたモード同期方法が光コム実現に利用できることを示したはじめてのものであり、しかも長時間連続動作可能な周波数計測・比較器として用いることができることまで実証した。

2. 周波数計測・比較には、 f_{CEO} の位相同期が必要であり、通常、励起レーザーパワーの制御が用いられる。励起レーザーパワーに対する応答周波数よりも、 f_{CEO} の位相ゆらぎの周波数成分を低くするために、複数のレーザーパラメータに対する f_{CEO} 線幅の依存性が測定された。このような測定はほかのレーザーを含めて数例しか報告されていない。モード同期や光コムの物理の理解にも本質的なもので、当該分野にインパクトのある研究成果である。

3. レーザーへの光コムの位相同期は、 piezo 素子を用いたものでは最高水準の残留位相雑音を実現した。この目的で導入された高速制御を可能とする piezo 素子マウントのほか、結晶位置制御による f_{CEO} 位相同期の長期化、ほぼ密閉し温度安定化を行ったレーザー共振器など、本研究を進める中で行われた様々な装置の工夫は、当該分野に広く役立つ成果である。

4. f_{rep} の高周波数化のために行った研究は、光コムとしては完成しなかったが、その実現に向けてよい見通しを与えている。

以上本論文は、当初目標どおり、低パワーの半導体レーザー励起で低雑音かつ長時間連続運転可能な光コムを実現し、量子光工学、レーザー工学の両分野や精密計測などの応用に大きな成果があり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年 6 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

